

# Elektromagnetik dalgaların düzgün olmayan yüzeye sahip bir yarı-uzay içine gömülü cisimlerden saçılması

Yasemin ALTUNCU\*, İbrahim AKDUMAN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

*Bu çalışmada, engebeli yüzeyler altına gömülü cisimlere ilişkin elektromagnetik saçılma problemlerinin çözümü için yeni ve efektif bir yöntem verilmiştir. Söz konusu problemler dielektrik mayınların tespiti, tahribatsız muayene, yer kabuğu altındaki çatlak ve fayların belirlenmesi gibi pek çok uygulama alanına sahip olmaları sebebiyle elektromagnetik teoride büyük öneme sahiptirler. Her ne kadar bu uygulamalar ters saçılma problemlerinin konusu olarak bilinse de bunlara ilişkin düz saçılma problemlerinin çözümü, ters problem algoritmalarının elde edilmesi sırasında ortaya çıkan zorlukların üstesinden gelinmesine büyük katkılar sağlamaktadır. Bu çalışmada verilen yöntemde ilk olarak düzlemsel olmayan bir arayüzle birbirinden ayrılmış iki parçalı uzaya ilişkin Green fonksiyonu kullanılarak engebeli yüzey altına gömülü cisimlerden saçılma problemi ikinci tip bir Fredholm integral denkleminin çözümüne indirgenmiştir. Elde edilen integral denklemin çözümü Moment yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Diğer taraftan, arayüzeyi engebeli iki parçalı uzayın Green fonksiyonunun belirlenmesi de ayrı ve zor bir problemdir. Bu problemin çözümü “gömülü cisim yaklaşımı” adını verdiğimiz ve yüzeydeki pürüzlülük ve engebelerin, düzlemsel arayüzle birbirinden ayrılmış olan iki parçalı uzaya gömülü cisimler olarak kabul edilmesi esasına dayalı bir yaklaşım kullanılarak yapılmıştır. Bu tür bir yaklaşım, problemi düzlemsel arayüzle birbirinden ayrılmış iki parçalı uzaya gömülü silindirik cisimlerden, silindirik dalgaların saçılması problemine dönüştürmeye olanak vermektedir. Yöntem, lokal bir aralıkta, değişimi nasıl olursa olsun düzgün olmayan tüm yüzeyler için oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Yapılan sayısal uygulamalar ile yöntemin doğruluğu ve çeşitli parametrelerin saçılan alana etkisi gösterilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Gömülü cisim yaklaşımı, elektromagnetik saçılma, engebeli yüzey.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Yasemin ALTUNCU. yaltuncu@ehb.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 33 35.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Buried object approach for solving electromagnetic scattering problems involving rough surfaces" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 19.04.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 06.06.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.10.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Scattering of electromagnetic waves by bodies buried in a half-space with rough surface

### Extended abstract

In this work, a novel and effective method is presented for the solution of the problems related to objects buried beneath rough surfaces. Such problems are of great importance in electromagnetic theory due to their potential applications in practice such as detection and location of dielectric mines, non-destructive testing, determination of underground cracks and earthquake etc. Although these applications are recognized as an “inverse scattering problem” in electromagnetic theory, the solutions of the related direct scattering problems make a valuable contribution to overcome difficulties which may occur in the investigation of inversion algorithms.

In this work we consider cylindrical bodies buried in a half-space having one dimensional locally rough surface in the case of plane wave illumination. The upper and lower half spaces separated by a rough interface are filled with simple non-magnetic materials. The material of the buried bodies are assumed to be inhomogeneous. Geometry of the problem is homogeneous in the  $Ox_3$  direction. The scattering problem considered here is to determine the effect of the buried body as well as the roughness of the surface on the propagation of electromagnetic waves excited in the upper half space. To this end the bodies are illuminated by a time harmonic plane wave whose electric field vector is always parallel to  $Ox_3$  direction namely;

$$u_i(x_1, x_2) = e^{-ik_1(x_1 \cos \phi_0 + x_2 \sin \phi_0)}$$

where  $\phi_0$  is the incidence direction and  $k_1$  is the wave number of the upper half space. Then the problem is reduced to scalar one and the total field function  $u(x)$  satisfies the reduced wave equation

$$\Delta u + \bar{k}^2(x)u = 0$$

in the sense of distributions (İdemen, 1973), where  $\bar{k}(x)$  denotes the wave number of the whole space and  $x = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2$ . The contributions of the buried body to the total field i.e.: scattered field consists in the difference  $u_s(x) = u(x) - u_0(x)$  and satisfies the equation

$$\Delta u_s + k^2(x)u_s = -k_2^2 v(x)u$$

under Sommerfeld radiation condition. Here  $v(x)$  stands for the so called object function related to buried body and it is zero outside the body. Through the Green's function of the two-part space with rough interface  $\bar{G}(x; y)$ , differential equation for the scattered field  $u_s(x)$  is reduced to the solution of a Fredholm integral equation of second kind, namely

$$u_s(x) = k_2^2 \int_B \bar{G}(x; y) v(y) (u_0(y) + u_s(y)) dy$$

where  $B$  is the cross section of the body in  $Ox_1x_2$  plane. The above integral equation is solved here by using Method of Moments (MoM).

On the other hand the determination of the Green's function constitutes a separate and difficult problem in the case of two-half spaces characterized by different media and separated by a rough interface. Here we give a new and general method called “buried object approach” (BOA) which is based on the assumption that the perturbations of the rough surface from the planar one are objects located at both sides of the planar boundary. The Green's function can be written as

$$\bar{G}(x; y) = G_0(x; y) + G_s(x; y)$$

where  $G_0(x; y)$  is the well known Green's function related to two-part space with planar boundary. The second term  $G_s(x; y)$  is the contribution of the surface roughness and satisfies the equation

$$G_s(x; y) = k_2^2 \int_B \bar{G}(x; z) v_R(z) (G_0(z; y) + G_s(z; y)) dz$$

where  $v_R$  is the object function related to surface roughness. Modelling the roughness in such a way lead us to formulate the problem as scattering of cylindrical waves from finite number of buried homogeneous cylindrical bodies, which is solved through a numerical method based on MoM.

The present method is very effective for surfaces having a localized roughness, arbitrary rms height and slope. The locality limitation of the surface is to guarantee to have finite number of objects in the evaluation of the Green's function. The method permits us to obtain both near and far field expressions of the scattered wave for buried objects of arbitrary number and shapes and there is no restriction on the level of the roughness.

**Keywords:** Buried object approach, electromagnetic scattering, rough surface.

## **Giriş**

Elektromagnetik dalgaların tabakalı bir ortam içine gömülü cisimlerden saçılmasının analizi, hem teorik hem de mühendislik uygulamalar açısından elektromagnetik teori içerisinde önemli bir problem grubunu oluşturmaktadır. Bu önemin nedeni, sözkonusu analizlerin sonuçlarının dielektrik mayınların belirlenmesi, tahribatsız muayene, yeraltındaki boru hatlarının ve tünellerin belirlenmesi, yer kabuğu içerisindeki fayların ve çatlakların tespit edilmesi gibi birçok alanda uygulamaya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Her ne kadar yukarıda sözü edilen uygulamalar elektromagnetik teori içerisinde bir “ters saçılma problemi” oluştursa da, bu problemlere ilişkin düz saçılma problemlerinin çözümü, karşılaşılabilecek değişik türden zorlukların üstesinden gelinebilmesinde önemli katkılar sağlayacaktır. Örneğin, diğer cisimlerin varlığı ve nemli toprak içerisine RF dalgaların düşük iletimi nedeniyle dielektrik mayınların belirlenmesinde birçok zorluk ortaya çıkar. Bu hallerle ilişkin saçılma problemlerinin incelenmesi, kullanılacak dalgaların yapısı, frekansı, uygun yöntem vb. birçok parametrenin seçiminde yol gösterici olur. Son otuz yıllık dönem içerisinde, gömülü cisimlerden belirli dalgaların (elektromagnetik, akustik, elastik v.b.) saçılması probleminin çözümü için çeşitli analitik ve sayısal yöntemler geliştirilmiş olmasına karşın bunların pek çoğunda cisimlerin gömülü olduğu tabakaların düzlemsel yüzeylerle birbirinden ayrıldığı kabul edilmiştir (Mahoud vd., 1981; Hill, 1988; Ellis ve Peden, 1995; Akduman ve Alkumru, 1995). Oysa gerçek uygulamalarda tabakaları birbirinden ayıran yüzeyler düzlem değildir ve daha geçerli ve uygulanabilir çözümler elde edilebilmesi için gerçeğe uygun modellemeler yapılarak problemin çözülmesi gerekir. Son yirmi otuz yıllık dönem içerisinde bu tür problemlere giderek artan bir ilgi vardır. Genelleştirilmiş sınır koşulu yaklaşımı altında bir integral denklem kullanılarak, sinüsoidal yüzey altına gömülü cisimlerden saçılma probleminin çözümü Cottis ve Kannelopoulos, (1992) ve Cottis ve diğerlerinde (1996) incelenmiştir. Mertebesi oldukça düşük olan engebeli yüzeyler altına gömülü cisimlerden saçılma problemlerinin çözümü için küçük pertürbasyon yaklaşımı temeline

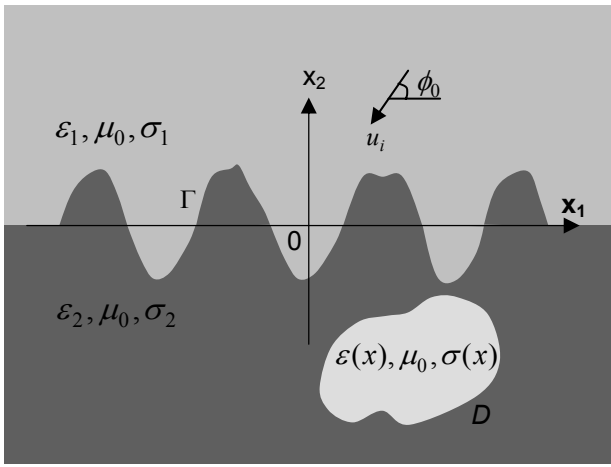
dayalı bir analitik yöntem Lawrance ve Sarabandi (2002) tarafından sunulmuştur. Chiu ve Sarabandi, (1999) ve Johnson’da (2001) ise yine bu çalışmada olduğu gibi engebeli yüzeyin mertebesinin çok düşük olduğu durumlarda geçerli olan yaklaşık analitik çözümler verilmiştir. Diğer taraftan düzgün olmayan iki boyutlu (2D) yüzeyler altına gömülü üç boyutlu (3D) cisimlerden elektromagnetik dalgaların saçılması problemi, iki boyutlu saçılma problemine yani silindirik cisimlerden saçılma problemine göre daha karmaşık ve daha büyük CPU zamanı gerektiren bir problemidir. Bu konuda yapılmış az sayıdaki çalışmadan birkaçı Johnson ve Burkholder, (2004); Morgenthaler ve Rappaport, (2001); El-Shenawee’nın (2003) yapmış olduğu çalışmalardır.

Bu çalışmanın amacı, düzlemsel olmayan bir yüzey tarafından sınırlandırılmış homojen bir yarı uzay içerisine gömülü cisimlerden düzlemsel elektromagnetik dalgaların saçılması probleminin çözümü için yeni ve etkin bir yöntem sunmaktır. Gömülü cisimlerin homojen olmadığı yani dielektrik kaysayıları ve iletkenliklerinin konumun fonksiyonu olduğu varsayılmıştır. Yöntem düzgün olmayan bir arayüzle birbirinden ayrılmış iki yarı uzaydan oluşan uzayın Green fonksiyonunun elde edilmesi temeline dayanmaktadır. Bu Green fonksiyonunun elde edilmesi, genelde zor ve karmaşık bir problem olarak ortaya çıkar. Bu çalışmada, sözkonusu Green fonksiyonunun elde edilmesi için yeni ve etkin bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem, düzlemsel olmayan yüzeyin, düzlemsel yüzeyden sapmalarının birer cisim olarak kabul edilmesine dayanır. Böylece problem, düzlemsel bir yüzey ile ayrılmış iki parçalı uzay içerisine gömülü cisimlerden saçılma problemine indirgenmiş olur. Green fonksiyonunun bilinmesi ile, düzlemsel olmayan yüzey altına gömülü cisimlerden saçılma problemi ikinci çeşit bir Fredholm integral denkleminde indirgenerek çözümü Moment yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Burada verilen yöntem, hem düşük hem de yüksek mertebeden engebeli yüzeyler halinde oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Elde edilen sonuçlar literatürde varolanlarla karşılaştırılmış ve değişik parametreler için doğruluğu oldukça yüksek sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Bu çalışmada zamana bağımlılık  $e^{-i\omega t}$  olarak kabul edilmiştir.

### Problem formülasyonu

Problem geometrisi Şekil 1'de verilmiştir. Bu konfigürasyonda, uzay  $\Gamma$  arakesit yüzeyi ile iki yarı uzaya ayrılmıştır.  $\Gamma$ ,  $x_2 = f(x_1)$  şeklinde bir fonksiyonla tanımlı olabileceği gibi rastgele olarak da üretilmiş olabilir.  $x_2 > f(x_1)$  ve  $x_2 < f(x_1)$  bölgeleri, dielektrik geçirgenlikleri ve iletkenlikleri sırasıyla  $\varepsilon_1, \sigma_1$  and  $\varepsilon_2, \sigma_2$  olan magnetik olmayan basit malzemeler ile doldurulmuştur.



Şekil 1. Problem geometrisi

$x_2 < f(x_1)$  alt yarı uzayında,  $Ox_1x_2$  düzlemindeki kesiti  $B$  olan sonsuz uzun silindirik bir  $D$  cismi  $Ox_3$  eksenine paralel olarak yerleştirilmiştir. Cismi oluşturan malzemenin dielektrik geçirgenliği ve iletkenliği konumun fonksiyonu olarak noktadan noktaya değişebilmekte ve sırasıyla  $\varepsilon(x)$  ve  $\sigma(x)$  ile gösterilmektedir. Burada  $x = (x_1, x_2)$  konum vektörüdür. Burada ele alınacak problem  $x_2 > f(x_1)$  bölgesinde uyarılmış düzlemsel dalganın  $D$  cisiminden saçılmasını incelemekten ibarettir. Bu amaçla cisim elektrik alan vektörü daima  $Ox_3$  eksenine paralel olan düzlemsel bir dalga ile aydınlatılmıştır. Gelen dalga olarak adlandıracağımız bu dalganın elektrik alan vektörü

$$\begin{aligned} \vec{E}^i(x) &= (0, 0, u^i(x)) \\ u^i(x) &= e^{-ik_1(x_1 \cos \phi_0 + x_2 \sin \phi_0)}, \quad x_2 > f(x_1) \end{aligned} \quad (1)$$

şeklinde. Burada  $\phi_0$  düzlemsel dalganın geliş doğrultusunu gösterirken  $k_1$  ise  $x_2 > f(x_1)$  bölgesine ait dalga sayısını göstermektedir. Problem  $Ox_3$  eksenine doğrultusunda homojen olması sebebiyle toplam elektrik alanında  $Ox_3$  eksenine paralel olacaktır. Yani  $\vec{E}(x) = (0, 0, u(x))$  şeklindedir. Bu da problemin  $u(x)$  bakımından iki boyutlu skaler probleme indirgenmesine olanak verir ve  $u(x)$  indirgenmiş dalga denklemi olan

$$\Delta u(x) + \bar{k}^2(x)u(x) = 0 \quad (2)$$

denklemini radyasyon koşulu altında distribüsyon anlamında sağlar (İdemen, 1973). Burada  $\bar{k}(x)$  tüm uzaya ilişkin dalga sayısını göstermektedir.

$D$  cisminin olmaması durumunda (1)'deki gelen dalga için tüm uzaydaki toplam alanı  $u_0$  ile gösterelim. Bu alan,

$$\Delta u_0(x) + k(x)u_0(x) = 0 \quad (3)$$

denklemini distribüsyon anlamında sağlar. Burada

$$k(x) = \begin{cases} k_1 & , \quad x_2 > f(x_1) \\ k_2 & , \quad x_2 < f(x_1) \end{cases} \quad (4)$$

$\Gamma$  yüzeyi ile ayrılmış iki parçalı uzaya ait dalga sayısıdır.

$D$  cisminin toplam alana katkısını, başka bir ifadeyle  $D$  cisiminden saçılan alanı,  $u_s$  ile gösterelim. Bu alan,  $u_s(x) = u(x) - u_0(x)$  farkına eşittir ve

$$\Delta u_s(x) + k^2(x)u_s(x) = -k^2(x)u_0(x) \quad (5)$$

denklemini radyasyon koşulu altında sağlar. Bu ifadedeki  $v(x)$  cisim fonksiyonu olarak adlandırılır ve

$$\nu(x) = \frac{\varepsilon(x) + i \frac{\sigma(x)}{\omega}}{\varepsilon'(x) + i \frac{\sigma'(x)}{\omega}} - 1 \quad (6)$$

ile tanımlıdır. Burada:

$$\varepsilon'(x) = \begin{cases} \varepsilon_1 & , \quad x_2 > f(x_1) \\ \varepsilon_2 & , \quad x_2 < f(x_1) \end{cases} \quad (7)$$

ve

$$\sigma'(x) = \begin{cases} \sigma_1 & , \quad x_2 > f(x_1) \\ \sigma_2 & , \quad x_2 < f(x_1) \end{cases} \quad (8)$$

(6)'ya göre  $B$  bölgesi dışında  $\nu(x)$  cisim fonksiyonun sıfıra eşit olacağı açıktır.

Düzgün olmayan  $\Gamma$  yüzeyi ile ayrılmış iki parçalı uzayın Green fonksiyonunu  $\overline{G}(x; y)$  ile gösterelim.  $\overline{G}(x; y)$  kullanılarak (5) denklemi,  $u_s(x)$  için aşağıdaki ikinci tip Fredholm integral denklemine dönüştürülebilir.

$$u_s(x) = k_2^2 \int_B \overline{G}(x; y) \nu(y) u(y) dy \quad (9)$$

$\overline{G}(x; y)$  bilindiği takdirde (9)'daki integral denklem moment yöntemi temeline dayalı bir yöntem kullanılarak çözülebilir (Richmond, 1964).

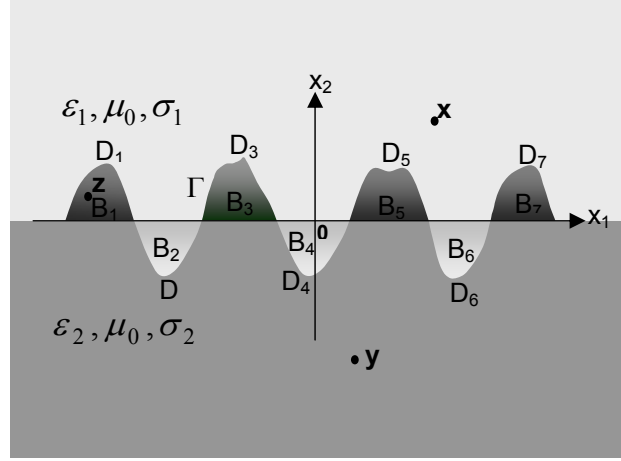
### Düzgün olmayan bir arayüzle ayrılmış iki parçalı uzayın Green fonksiyonu

Tanım gereği düzgün olmayan  $\Gamma$  yüzeyi ile ayrılmış iki parçalı uzayın Green fonksiyonu  $\overline{G}(x; y)$ ,

$$\Delta \overline{G}(x; y) + k^2(x) \overline{G}(x; y) = -\delta(x - y) \quad (10)$$

denklemini  $|x| \rightarrow \infty$  için radyasyon koşulu altında sağlar. Ayrıca  $\Gamma$  boyunca  $\overline{G}$  ve  $\frac{\partial \overline{G}}{\partial n}$  süreklidir. Burada  $n$  normal doğrultusunu göstermektedir. Diğer taraftan  $\overline{G}(x; y)$ ,  $y \in R^2$  noktasına

yerleştirilen birim çizgisel kaynak sebebiyle  $x \in R^2$  noktasında oluşan toplam alandan başka bir şey değildir. Başka bir ifadeyle  $\overline{G}(x; y)$ 'yi elde edebilmek için  $\Gamma$  yüzeyinden silindirik dalgaların saçılması problemi çözmek yeterlidir.



Şekil 2. Düzgün olmayan yüzeyin gömülü cisim modeli

Şimdi  $x_2 = 0$  düzlemini göz önüne alalım ve uzayın bu düzlem ile iki parçaya ayrıldığını varsayalım (Bkz. Şekil 2). Bu halde  $\Gamma$  yüzeyi ile  $x_2 = 0$  düzlemi tarafından sınırlanan sınırlı bölgelerin bir kısmı  $x_2 > 0$  yarı uzayında bir kısmı da  $x_2 < 0$  yarı uzayında kalacaktır. Bu bölgelerden  $x_2 > 0$  yarı uzayında kalanları  $D_1, D_3, \dots, D_{2N-1}$ ,  $x_2 < 0$  yarı uzayında kalanları  $D_2, D_4, \dots, D_{2N}$  olarak gösterelim. Bu durumda,  $D_1, D_3, \dots, D_{2N-1}$  bölgelerinin dielektrik katsayıları ve iletkenlikleri sırasıyla  $\varepsilon_2$  ve  $\sigma_2$ ,  $D_2, D_4, \dots, D_{2N}$  bölgelerinin ise  $\varepsilon_1$  ve  $\sigma_1$ 'dir. Bu halde  $D_1, \dots, D_{2N}$  bölgeleri  $Ox_1x_2$  düzlemindeki kesiti  $B_1, \dots, B_{2N}$  olan ve  $x_2 > 0$  ve  $x_2 < 0$  yarı uzayları içine gömülü cisimler olarak düşünülebilir. Diğer bir deyişle bu yaklaşım ile  $x_2 = f(x_1)$  şeklinde bir fonksiyonla tanımlı olan veya rastgele olarak değişen bir arayüzey ile birbirlerinden ayrılmış iki parçalı uzaya ait Green fonksiyonunun belirlenmesi problemi,  $x_2 = 0$  düzlemi ile birbirlerinden ayrılmış iki

parçalı uzaya gömülü olan  $2N$  tane cisimden saçılma problemine dönüştürülmüş olur.

Problemi uygun bir şekilde düzenleyebilmek için  $\bar{G}(x; y)$  'yi

$$\bar{G}(x; y) = G_0(x; y) + G_s(x; y) \quad (11)$$

şeklinde yazalım. Burada  $G_0(x; y)$ ,  $D_1, \dots, D_{2N}$  cisimlerinin olmaması durumunda yani sınırı düzlem olan iki parçalı uzaya ait Green fonksiyonu iken  $G_s(x; y)$ ,  $D_1, \dots, D_{2N}$  cisimlerinin  $\bar{G}(x; y)$  'ye katkısı göstermekte olup

$$\Delta G_s(x; y) + k^2(x)G_s(x; y) = -k^2(x_2)\nu_R(x)\bar{G}(x; y) \quad (12)$$

denklemin radyasyon koşulu altında ve distribüsyon anlamında sağlar. Burada:

$$k(x_2) = \begin{cases} k_1 & , \quad x_2 > 0 \\ k_2 & , \quad x_2 < 0 \end{cases}$$

ve

$$\nu_R(x) = \begin{cases} \nu_1 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - 1 & , \quad x \in D_1, \dots, D_{2N-1} \\ \nu_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1 & , \quad x \in D_2, \dots, D_{2N} \end{cases} \quad (13)$$

$\nu_R(x)$   $D_1, \dots, D_{2N}$  cisimlerine ilişkin cisim fonksiyonu olarak adlandırılır ve (13)'ten açıkça görüleceği üzere  $B_1, \dots, B_{2N}$  bölgeleri dışında sıfırdır.

Arayüzeyi düzlem olan iki parçalı uzayın Green fonksiyonu olan  $G_0(x; y)$  bilindiği takdirde (12) ifadesi aşağıdaki gibi ikinci tip bir Fredholm integral denklemine dönüştürülebilir:

$$G_s(x; y) = k_1 \nu_1 \sum_{i=1}^N \int_{B_{2i-1}} G_0(x; z)(G_0(z; y) + G_s(z; y))dz + k_2 \nu_2 \sum_{i=1}^N \int_{B_{2i}} G_0(x; z)(G_0(z; y) + G_s(z; y))dz \quad (14)$$

$G_s(x; y)$  için lineer bir integral denklem olan (14) bilinen sayısal tekniklerden biri kullanılarak çözülebilir.

## Sayısal sonuçlar

Bu bölümde yöntemin doğruluğunu ispatlamak ve çeşitli parametrelerin çözüm üzerine etkilerini göstermek için bazı örnekler verilecektir. İlk örnek hariç bütün örneklerde gerçek problemlere uygunluk açısından alt yarı uzay kuru toprak üst yarı uzay ise hava olarak seçilmiş olup çalışma frekansı  $300MHz$  olarak alınmıştır.

Yöntemin doğruluğunu göstermek amacıyla ilk olarak sinüsoidal değişime sahip bir yüzey altına gömülü dairesel kesitli dielektrik silindir gözönüne alınmıştır. Bu örneğin parametreleri Lawrance ve Sarabandi'de (2002) verilenlerle aynı seçilmiştir. Yani iki yarı uzayı ayıran düzğün olmayan ara yüzeyin değişimi

$$f(x_1) = 0.0064\lambda \cos\left(\frac{2\pi}{0.6\lambda}x_1\right) \quad \text{fonksiyonuyla}$$

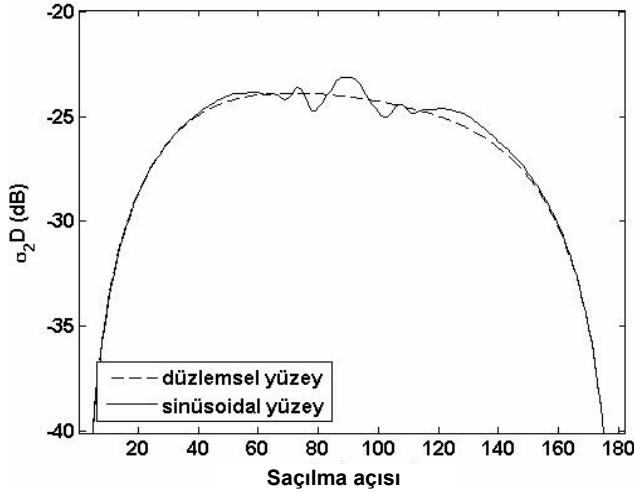
belirli olup üst ve alt yarı uzayın parametreleri sırasıyla  $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$  ve  $\varepsilon_2 = 4\varepsilon_0$ ,  $\sigma_2 = 2.22 \cdot 10^{-5}$  şeklindedir. Silindirik cismin yarıçapı  $0.16\lambda$ , parametreleri ise  $\varepsilon = 2.25\varepsilon_0$ ,  $\sigma = 0$  olarak seçilmiş olup  $x_2 = 0$  düzleminden  $1.3\lambda$  kadar aşağı gömülmüştür. Burada  $\lambda$ , gelen dalganın üst yarı uzaydaki dalga boyunu göstermektedir.

Düzlemsel dalganın geliş açısı  $\phi_0 = \frac{\pi}{3}$  olarak

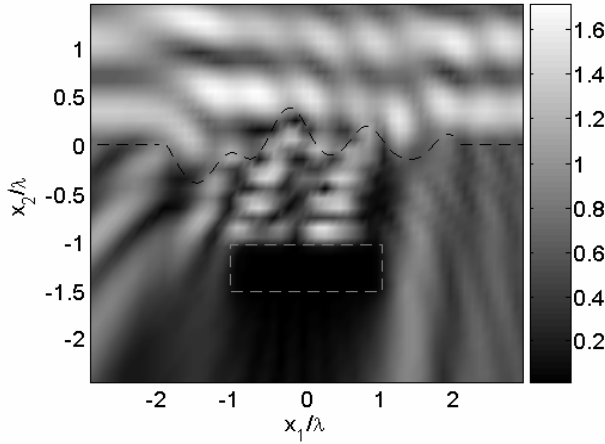
seçilmiştir. Dairesel kesitli silindirik cismin düzlemsel ve sinüsoidal yüzey altına gömülü olma durumları için uzak alan radar kesiti (RCS)'nin saçılma açısına bağlı değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Lawrance ve Sarabandi'de (2002) verilen sonuçlarla birebir örtüşmektedir.

Şekil 4'te  $6\lambda \times 4\lambda$  'lık dikdörtgen bir bölgede toplam alanın genliği çizilmiştir. Bu örnekte alt yarı uzayın parametreleri  $\varepsilon = 3.6\varepsilon_0$ ,  $\sigma = 10^{-5}(S/m)$  (kuru toprak), gömülü cismin parametreleri ise  $\varepsilon = 5.5\varepsilon_0$ ,  $\sigma = 0.5(S/m)$  olarak seçilmiştir. Gömülü cisim, boyutları  $2\lambda \times 0.5\lambda$  olan dikdörtgen kesitli bir silindir olup  $x_2 = 0$  düzleminden  $1\lambda$  aşağı gömülmüştür. Üst yarı uzay ve alt yarı uzayı ayıran arayüzey  $x_1$  doğrultusunda

rastgele bir değişime sahiptir. Düzlem dalganın geliş açısı ise  $\phi_0 = \frac{\pi}{4}$  'tür.



Şekil 3. Sinüsoidal olarak değişen yüzeyin saçılma paternine etkisi

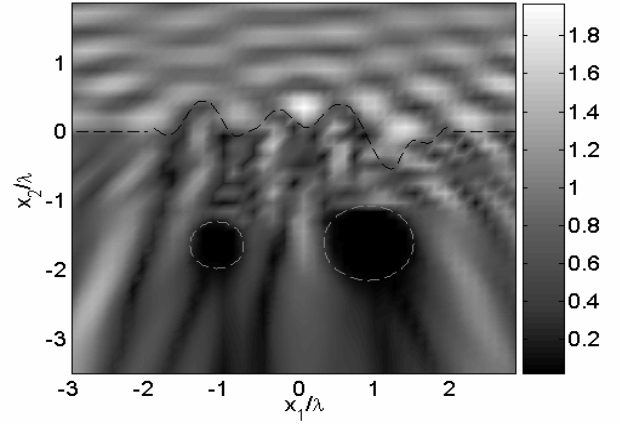


Şekil 4. Rastgele olarak değişen bir yüzey altına gömülü dikdörtgen kesitli bir cismin varlığı durumunda toplam alan

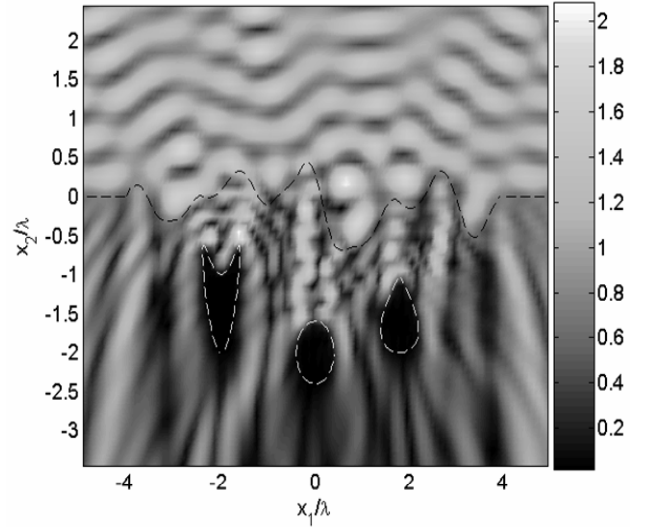
Şekil 5'te yine rastgele değişime sahip bir yüzey altına gömülü yarıçapları  $0.3\lambda$  ve  $0.5\lambda$  olan iki dairesel silindirik cismin varlığı durumunda  $6\lambda \times 5.5\lambda$  'lık bir dikdörtgen bölgede toplam alanın genliği çizilmiştir. Gömülü cisimlerin parametreleri  $\varepsilon = 16\varepsilon_0$ ,  $\sigma = 2.13(S/m)$  olup düzlemsel dalga  $\phi_0 = \frac{\pi}{2}$  'lik bir açıyla gelmektedir.

Son örnekte ise uçurtma, damla ve daire şeklinde kesitlere sahip olan silindirik cisimlerin var-

lığı durumunda toplam alan yine dikdörtgen bir bölge üzerinde hesap edilmiş ve değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu örnekte cisimlerin parametreleri sırasıyla  $\varepsilon = 20\varepsilon_0$ ,  $\sigma = 3(S/m)$ ,  $\varepsilon = 20\varepsilon_0$ ,  $\sigma = 0.5(S/m)$ ,  $\varepsilon = 20\varepsilon_0$ ,  $\sigma = 1(S/m)$  dir. Yüzey rastgele olarak değişirken düzlemsel dalganın geliş açısı  $\frac{\pi}{2}$  'dir.



Şekil 5. Rastgele olarak değişen yüzey altına gömülü farklı yarıçaplı dairesel kesitli cisimlerin varlığı durumunda toplam alan



Şekil 6. Rastgele olarak değişen yüzey altına gömülü farklı kesitli cisimlerin varlığı durumunda toplam alan

## Sonuçlar

Bu çalışmada düzgün olmayan, engebeli yüzeyler altına gömülü cisimlere ilişkin saçılma problemlerinin çözümü için yeni bir yöntem veril-

miştir. Bu yöntemin kullanılmasıyla elde edilen uzak alan radar kesiti (RCS) değerleri (Lawrance ve Sarabandi, 2002)'de verilen değerlerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle çok iyi uyduğu görülmüştür. Verilen yöntem kullanılarak hem uzak alan hem de yakın alan hesabı yapılabildiği gibi yöntemin geçerlilik aralığı oldukça geniştir. Yüzeyin değişimi, seviyesi, gömülü cisimlerin geometrisi, sayısı ve elektriksel parametreleri üzerinde yöntem açısından bir kısıtlama yoktur. Bununla birlikte engbelerin seviyesinin çok yüksek olması, gömülü cisimlerin boyutlarının ve sayısının fazla olması hesaplama süresi artırmaktadır.

## Kaynaklar

- Akduman I., Alkumru A., (1995). A generalized ART algorithm for inverse scattering problems related to buried cylindrical bodies, *Invese Problems*, **11**, 1125-1135.
- Cottis P.G. ve Kannelopoulos J.D., (1992). Scattering of electromagnetic waves from cylindrical inhomogeneities embedded inside a lossy medium with sinusoidal surface, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **6**, 4, 445-458.
- Cottis P.G., Vazouras C.N., Kalamatianos C. ve Kannelopoulos J.D., (1996). Scattering of TM waves from a cylindrical scatterer buried inside a two-layer lossy with sinusoidal surface, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **10**, 1005-1021.
- Chiu T., Sarabandi K., (1999). Electromagnetic scattering interaction between a dielectric cylinder and slightly rough surface, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, **47**, 902-913.
- Ellis G.A., and Peden I.C. , (1995). An analysis technique for buried inhomogeneous dielectric objects in the precence of an air-earth interface, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, **13**, 3, 535-540.
- El-Shenawee M., (2003). Scattering from multiple objects buried beneath two-dimensional random rough surface using the Steepest Descent Fast Multipole Method, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, **51**, 4, 802-809.
- Hill D.A., (1988). Electromagnetic scattering by buried objects of low contrast, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, **26**, 2, 195-203.
- İdemem M., (1973). Maxwell's equations in the sense of distributions, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, **21**, 5, 736-738.
- Johnson J.T., (2001). Thermal emission from a layered medium bounded by a slightly rough interface, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 368-378.
- Johnson J.T., Burkholder R.J., (2004). A study of scattering from an object below a rough surface, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, **42**, 1, 59-66.
- Lawrance D.E. ve Sarabandi K., (2002). Electromagnetic scattering from a dielectric cylinder buried beneath a slightly rough surface, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, **50**, 10, 1368-1376.
- Mahoud S.F., Ali S.M., Wait J.R., (1981). Electromagnetic Scattering from a buried cylindrical inhomogeneity inside a lossy earth, *Radio Science*, **16**, 6, 1285-1298.
- Morgenthaler A.W. ve Rappaport C.M., (2001). Scattering from lossy dielectric objects buried beneath randomly rough ground: validiting the semi-analytical mode matching algorithm with 2-D FDFD, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 11, 2421-2428.
- Richmond J.A., (1964). Scattering by a dielectric cylinder of arbitrary cross section shape, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, **13**, 3, 334-341